

## UTILIZAÇÃO DE ACELEROGRAMAS SIMULADOS NA ANÁLISE SÍSMICA DE ESTRUTURAS

**J.M.C. ESTÊVÃO**

Prof. Adjunto  
ISE-UAIG  
Faro - Portugal

**C.S. OLIVEIRA**

Prof. Catedrático  
ICIST-IST-UTL  
Lisboa - Portugal

### SUMÁRIO

As análises sísmicas dinâmicas não lineares de estruturas requerem a definição da acção sísmica na forma de um acelerograma. Estes podem ser obtidos em registos de movimentos sísmicos intensos resultantes de um sismo real, ou podem ser usados acelerogramas sintéticos. A utilização de acelerogramas registados, nas avaliações do comportamento sísmico de edifícios localizados em Portugal, está bastante condicionada pelo facto de existirem poucos acelerogramas obtidos de registos de vibrações sísmicas intensas, provocadas por sismos de magnitude elevada. Para dar resposta a esta condicionante, a alternativa é o recurso a acelerogramas sintéticos, que, de acordo com o Eurocódigo 8 (EC8), podem ser divididos em artificiais e em simulados. Muito embora a geração de acelerogramas artificiais seja mais apelativa para os engenheiros de estruturas, a sua utilização será sempre questionável do ponto de vista da sismologia, dado que conduzem a acelerogramas irrealistas, pois são séries temporais (estacionárias em conteúdo espectral) ajustadas a um espectro de resposta, não traduzindo o real efeito de um evento sísmico. Uma alternativa consiste na utilização de acelerogramas simulados. Neste trabalho, é apresentado um método de simulação estocástica de movimentos sísmicos, que são gerados de forma a reproduzirem, de uma maneira aproximada, a influência da magnitude, do mecanismo focal e do caminho de propagação, visando o seu ajuste às características das fontes sismogénicas de cada território, e tendo em conta os efeitos da geologia local. A metodologia foi implementada no programa informático SIMULSIS e aplicada na simulação de sismos ocorridos no passado. Em seguida, para ilustrar a capacidade do programa, foram realizadas simulações de sismos com diferentes características, de modo a que a média dos respectivos espectros de resposta se ajustem aos sismos tipo 1 e 2 estabelecidos no Anexo Nacional para o Algarve, no cumprimento dos requisitos estipulados no EC8 para as análises dinâmicas não lineares.

### 1. INTRODUÇÃO

O Anexo Nacional (NA) ao Eurocódigo 8 (EC8), na NP EN 1998-1:2010, permite a realização de análises não lineares como suporte ao dimensionamento de edifícios sem isolamento de base a construir em Portugal, muito embora coloque algumas restrições ao seu uso, designadamente exigindo que a selecção da acção sísmica seja devidamente fundamentada e mereça a concordância de uma entidade independente revisora do projecto [1].

O EC8 permite que o movimento sísmico possa ser representado em termos da variação da aceleração à superfície do terreno em função do tempo, podendo ser utilizados acelerogramas artificiais (acelerogramas sintéticos gerados de modo a corresponderem aos espectros de resposta elástica do EC8 estabelecidos para o local em causa), acelerogramas registados ou simulados (acelerogramas sintéticos gerados através de uma simulação numérica dos mecanismos na fonte ou da trajectória de propagação), em função da informação efectivamente disponível. A utilização de acelerogramas registados e de acelerogramas simulados está condicionada à necessidade das amostras utilizadas serem devidamente qualificadas relativamente às características sismogénicas da fonte e às condições do terreno do local, e que os seus valores sejam graduados em função do valor de  $a_g \cdot S$  da zona considerada.

Existem diversos estudos internacionais sobre a utilização de acelerogramas registados [revistos em 2] na análise sísmica de estruturas. Porém, em Portugal Continental estamos confrontados, até à data, com um número muito reduzido de registos de movimentos sísmicos intensos, e com o facto dos locais onde os registos foram obtidos

não estarem muito bem caracterizados do ponto de vista geotécnico, de modo a possibilitar uma adequada classificação do terreno de fundação de acordo com os tipos indicados no EC8.

Face às condicionantes apresentadas, a alternativa que se afigura mais viável, será a utilização de registos obtidos noutros países ou a utilização de acelerogramas sintéticos, sejam artificiais ou simulados.

Hoje existem múltiplas bases de dados com registos de movimentos sísmicos intensos [referidas em 3], no entanto, por enquanto, não existem muitos registos que possam ser candidatos viáveis para serem representativos da acção sísmica tipo 1 da NP EN 1998-1:2010, designadamente para a zona 1.1 (o Barlavento Algarvio), e para todos os possíveis tipos de terrenos de fundação, sem que sejam adoptados elevados factores de correcção das amplitudes dos movimentos sísmicos, o que é uma prática pouco consensual na comunidade científica. Muito embora alguns estudos indiquem que as ordens de grandeza dos factores de escala não são um problema determinante na análise não linear de estruturas [4], esses estudos não contemplaram as muito grandes magnitudes, que são de grande importância no contexto das fontes sismogénicas de Portugal Continental, designadamente no contexto da localização relativa do Algarve, que se encontra a menor distância em relação a essas possíveis fontes geradoras de sismos.

Como alternativa, a utilização de acelerogramas artificiais é muito apelativa para um Engenheiro de Estruturas, pois não requer conhecimentos de sismologia aprofundados. No entanto, é hoje reconhecido que este tipo de acelerogramas é irrealista, não sendo a forma mais adequada de representar os movimentos sísmicos com vista à análise não linear de estruturas [3].

Atendendo a todas as condicionantes apresentadas, a utilização de acelerogramas simulados parece ser a melhor alternativa a seguir, como forma de dar uma resposta adequada ao problema.

Existem múltiplos tipos de métodos de simulação de movimentos sísmicos intensos, podendo ser agrupados em determinísticos, empíricos, semi-empíricos, estocásticos e híbridos, sendo que os métodos estocásticos correspondem a metodologias ditas da “engenharia” para a resolução do problema, que têm apresentado bons resultados quando comparados os registos com os valores previstos pelas simulações [5].

Neste contexto, foi desenvolvido um programa informático para a simulação de movimentos sísmicos intensos, designado por ACELGER, com base num modelo com fonte pontual, e contemplando a resposta não linear dos solos de fundação. Este programa foi baseado no SMSIM [6], onde está implementado um método estocástico com fonte pontual muito conhecido [7, 8]. No entanto, do ponto de vista da análise sísmica de estruturas, foi constatado que o método não era o mais adequado, pois os acelerogramas simulados apresentavam o conteúdo espectral estacionário, com as estruturas a apresentar uma resposta linear ao longo do tempo, ressonante, essencialmente, num modo de vibração, ao invés do comportamento observado a partir de registos, em que a resposta sísmica linear das estruturas se apresenta com alteração dos modos de vibração ressonantes ao longo do tempo.

Face ao problema atrás identificado, foi desenvolvido um outro programa de computador, designado por SIMULSIS, gerador de acelerogramas com base num método estocástico com fonte extensa, e que também permite contemplar a influência da resposta não linear dos solos de fundação. As simulações de movimentos sísmicos obtidas com o SIMULSIS já parecem induzir uma resposta das estruturas com as mesmas características de não estacionaridade do conteúdo espectral observadas nos registos.

Neste trabalho, é verificada a viabilidade da utilização de programas de geração estocástica, com fonte extensa, de movimentos sísmicos simulados para efeitos da análise sísmica de estruturas, como o SIMULSIS, na geração de acelerogramas simulados que dêem resposta às exigências da NP EN 1998-1:2010.

## **2. PROGRAMA SIMULSIS**

O SIMULSIS é um programa informático que foi desenvolvido em Object Pascal [9] para utilização livre, e que se baseou no programa EXSIM [10], mas com a introdução de um conjunto de alterações tendo em vista a

otimização dos métodos de simulação estocástica visando a análise sísmica de estruturas. Este programa já foi utilizado com sucesso na simulação de sismos ocorridos no passado [11].

No SIMULSIS, cada acelerograma simulado, resultante de uma fonte extensa rectangular, corresponde à soma da contribuição de um conjunto finito de subfalhas, consideradas como fontes pontuais, cuja ruptura ocorre desfasada no tempo. Desta forma, a série temporal será obtida a partir de um somatório de harmónicas de amplitude  $A_{i,n(\Delta t)}$ , cujos ângulos de fase são gerados aleatoriamente entre 0 e  $2\pi$ , igual a

$$a_{g(t)} = \sum_{i=1}^{N_f} \sum_{n=1}^{N_{\omega}} A_{i,n(\Delta t)} \cdot \cos(\omega_n \cdot \Delta t_i + \theta_{n,i}) \quad (1)$$

Recentemente, o SIMULSIS foi alvo de diversas modificações visando a melhoria dos resultados. Uma das alterações que o programa apresenta em relação à versão anterior [11], diz respeito ao padrão de radiação. Actualmente, o padrão de radiação de cada subfalha ( $R_{\theta\phi_i}$ ), para as ondas S, é calculado com base numa proposta apresentada por Boore and Boatwright [12], sendo

$$R_{\theta\phi_i} = \sqrt{\frac{\int_{\theta_{1i}}^{\theta_{2i}} \int_0^{2\pi} (F_{SV}^2 + F_{SH}^2) \cdot \text{sen}(\theta) \cdot d\phi \cdot d\theta}{\int_{\theta_{1i}}^{\theta_{2i}} \int_0^{2\pi} \text{sen}(\theta) \cdot d\phi \cdot d\theta}} \quad (2)$$

em que os padrões de radiação  $F_{SV}$  e  $F_{SH}$  são obtidos de acordo com as Eq. (4.90-91) propostas por Aki and Richards [13].  $R_{\theta\phi_i}$  é uma função do azimute do traço da subfalha  $i$  ( $\phi_{Si}$ ), da inclinação do plano da subfalha ( $\delta_i$ ), da direcção da ruptura ( $\lambda_i$ ), do azimute da direcção subfalha-local de estudo ( $\phi_i$ ), e de dois ângulos limite da partida dos raios sísmicos ( $\theta_{1i}$  e  $\theta_{2i}$ ), tal como está esquematizado na Figura 1.

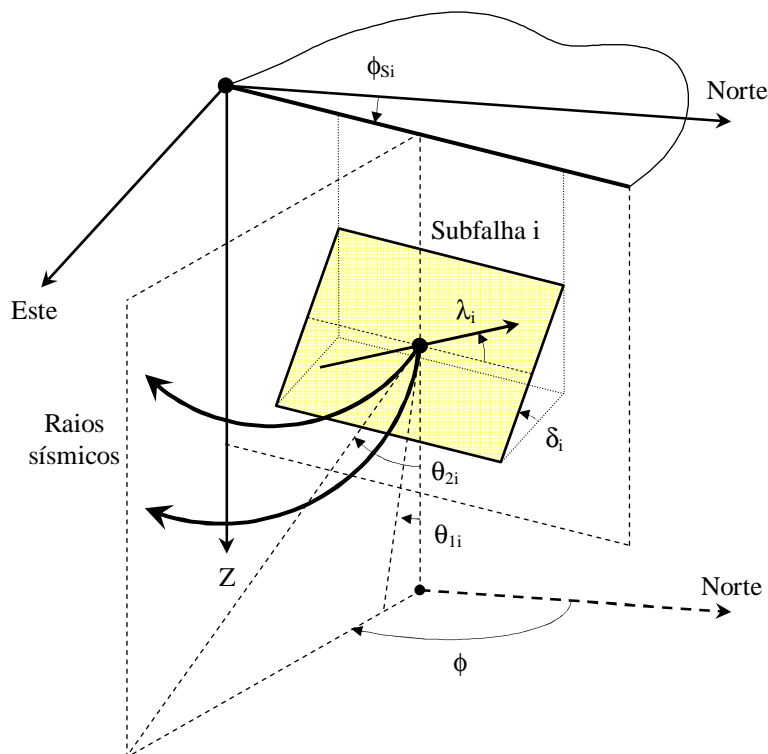


Figura 1: Esquematização da quantificação do padrão de radiação implementada no SIMULSIS.

Boore and Boatwright [12] sugerem três conjuntos diferentes para os valores dos ângulos de partida dos raios sísmicos:  $\theta_1=17^\circ$  e  $\theta_2=25^\circ$  para distâncias tele-sísmicas;  $\theta_1=60^\circ$  e  $\theta_2=120^\circ$  para distâncias regionais (dezenas ou centenas de quilômetros);  $\theta_1=120^\circ$  e  $\theta_2=180^\circ$  para pequenas distâncias.

Uma outra alteração ao programa SIMULSIS está relacionada com a possibilidade de ser considerada uma velocidade de ruptura não uniforme no plano da falha, com valores distintos para cada subfalha ( $V_{ri}$ ). Se não for considerada uma velocidade de ruptura constante, o modelo implementado no SIMULSIS para a quantificação do instante em que se realiza a ruptura de cada subfalha é baseado na hipótese de que a ruptura se propaga radialmente a partir de cada subfalha, tal como é apresentado na Figura 2. Em primeiro lugar é construída uma rede com todas as possíveis ligações entre os centros das subfalhas adjacentes. Em seguida, as distâncias dos vários troços da rede ( $d_{ij}$ ) e as correspondentes durações da ruptura ( $t_{ij}$ ), são determinadas assumindo, para tal, uma variação linear da velocidade de ruptura entre subfalhas, o que conduz a

$$d_{ij} = \int_0^{t_{ij}} V_r(t) \cdot dt \quad (3)$$

$$t_{ij} = \frac{2 \cdot d_{ij}}{V_{ri} + V_{rj}} \quad (4)$$

Por fim, os instantes de início da ruptura de cada subfalha são quantificados de modo a ser minimizada a duração total dos percursos entre a subfalha do foco e todas as restantes subfalhas.

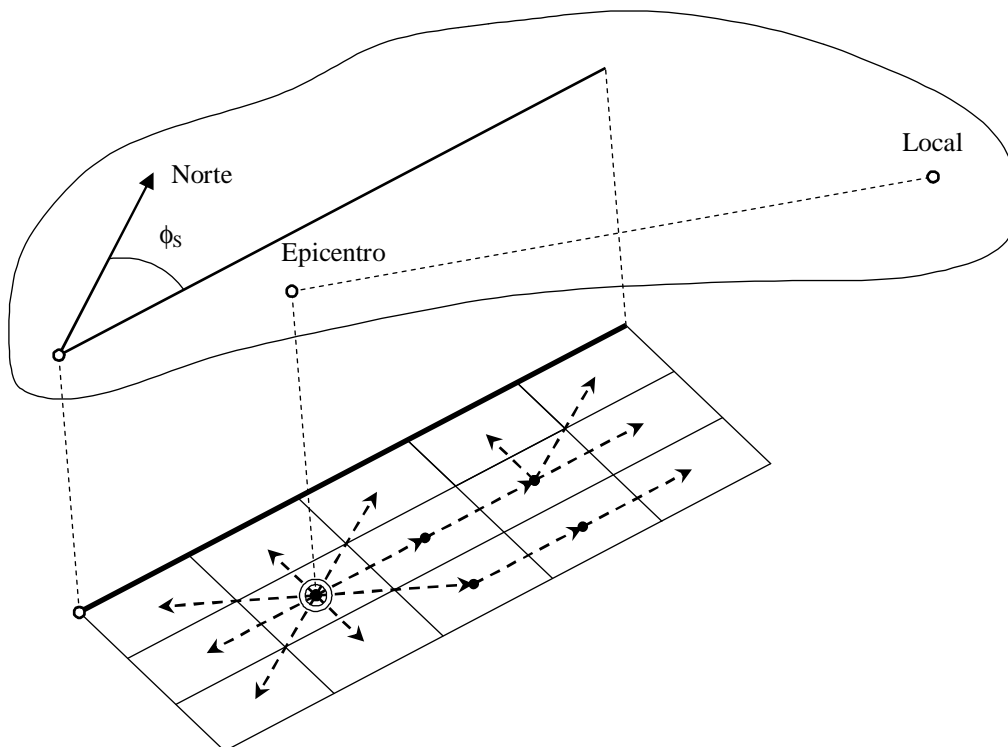


Figura 2: Exemplificação do procedimento destinado à quantificação da rede de percursos da ruptura.

Para facilitar a realização das simulações, foi adicionada ao programa a possibilidade da adopção de um sistema de coordenadas cartesianas ou de um sistema de coordenadas geográficas, que são depois convertidas para coordenadas cartesianas com recurso a um sistema de projecção cilíndrica transversa. Também é possível exportar os dados, de forma automática, para visualização no Google Earth.

### 3. SIMULAÇÃO DO SISMO DE 2009/12/17

O sismo de 2009/12/17, a que foi atribuída uma magnitude  $M_w = 5.5$ , com epicentro em  $36.4564^\circ\text{N}$  e  $9.9463^\circ\text{W}$  e o foco a 10 km de profundidade (EMSC), foi registado na rede de detecção de movimentos sísmicos intensos do Instituto Superior Técnico um pouco por todo o país, designadamente em dois locais da cidade de Portimão, distanciados entre si de cerca de 700 m, e estando situados a cerca de 147 km em relação ao epicentro (Figura 3). Este sismo e esta localidade de Portugal Continental foram escolhidos porque, à data, é onde existem os únicos dois registos do mesmo sismo em estações muito próximas e situadas em solos de características diferentes.



Figura 3: Localização dos pontos onde foram obtidos os registos em Portimão (instrumentos do IST).

O local 1 foi considerado como sendo um terreno tipo C (valor estimado:  $V_{s,30}=256$  m/s) com base numa sondagem existente a 170 m desse local. O local 2 foi considerado como sendo um terreno tipo B (valor estimado:  $V_{s,30}=400$  m/s) com base na observação do local. Os perfis estratigráficos estimados para os dois locais estão apresentados na Figura 4.

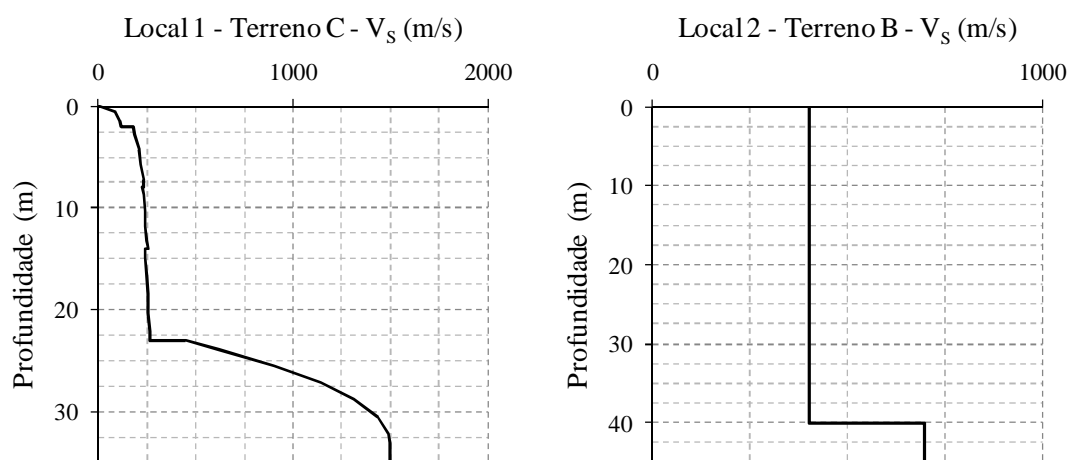


Figura 4: Perfis estratigráficos adoptados nas simulações, sendo o local 1 correspondente a um terreno tipo C ( $V_{s,30}=256$  m/s) e o local 2 correspondente a um terreno tipo B ( $V_{s,30}=400$  m/s).

Nas simulações realizadas foram adoptados os parâmetros para a atenuação geométrica e para a atenuação inelástica utilizados em outros estudos realizados para Portugal Continental [14]. As dimensões da falha foram obtidas com base em expressões empíricas para uma falha de desligamento [15], assim como o correspondente momento sísmico [16]. A queda de tensão média (estática) adoptada nas simulações foi de 110 bar, tendo sido admitida uma velocidade média das ondas S na fonte de  $\beta=3.7$  km/s, uma densidade do meio de propagação na fonte igual a  $\rho=2.8$  g/cm<sup>3</sup> e uma velocidade de ruptura de 2.96 km/s. A duração dos movimentos sísmicos foi obtida a partir de expressões empíricas obtidas para outras regiões do planeta [17]. No cálculo do padrão de radiação foram adoptados os seguintes valores:  $\theta_1=60^\circ$  e  $\theta_2=120^\circ$ . Para cada simulação e subfalha foi introduzida uma variação aleatória no valor do deslizamento ( $\pm 25\%$ ), na velocidade da ruptura ( $\pm 25\%$ ) e respectiva direcção ( $\pm 5^\circ$ ), no azimute do traço da subfalha ( $\pm 2.5^\circ$ ) e na inclinação do plano da subfalha ( $\pm 2.5^\circ$ ).

Os locais onde foram obtidos os registos constituíram os pontos de controlo das simulações realizadas com o programa SIMULSIS. Alguns dos melhores resultados das simulações realizadas para esses locais ( $f_{\text{máx}}=7$  Hz) estão apresentados nas Figuras 5 e 6.

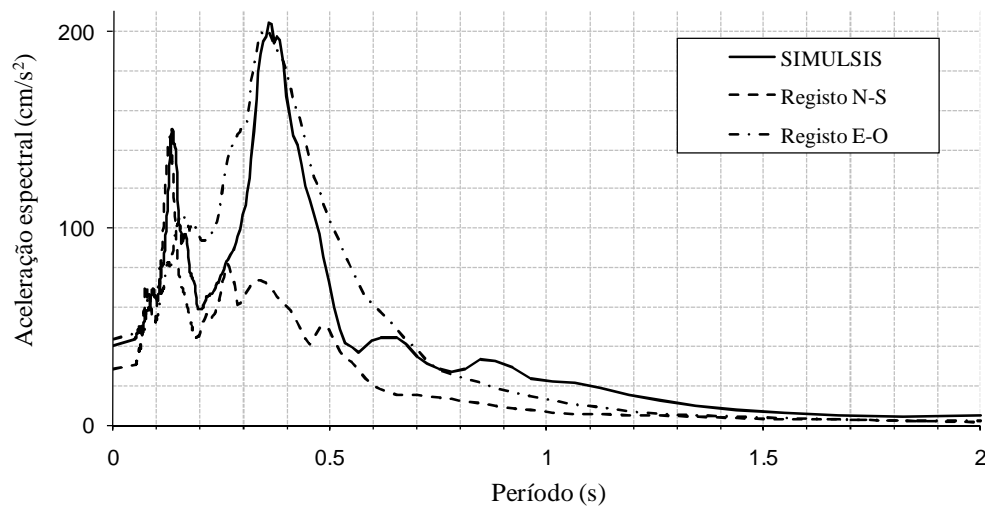


Figura 5: Comparação entre os espectros de resposta obtidos com o SIMULSIS e com os registos do sismo de 2009/12/17 no Local 1 (provável terreno tipo C).

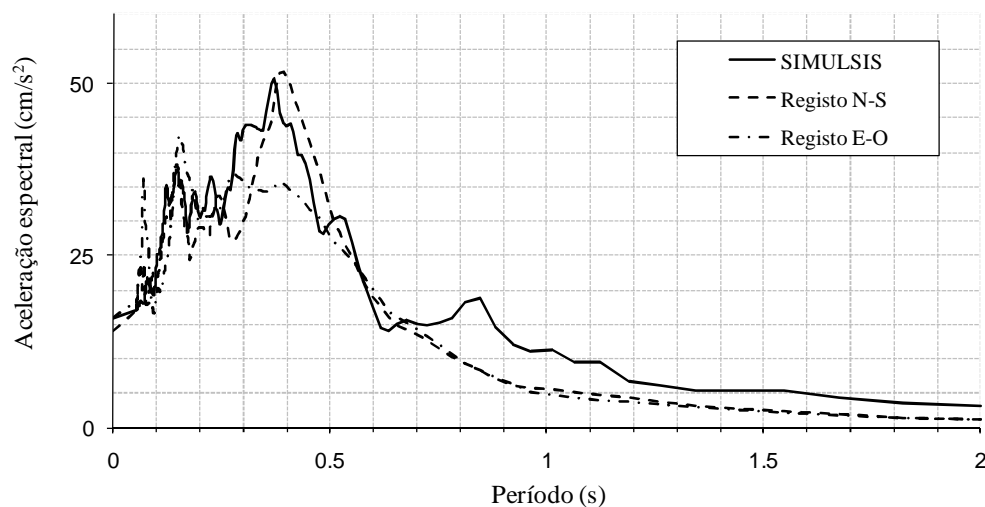


Figura 6: Comparação entre os espectros de resposta obtidos com o SIMULSIS e com os registos do sismo de 2009/12/17 no Local 2 (provável terreno tipo B).

A NP EN 1998-1:2010 contempla um factor  $S_{max}$  que corresponde ao factor  $S$  (coeficiente associado à amplificação dos solos) para acelerações inferiores a  $1 \text{ m/s}^2$ , que é igual a 1.35 para o terreno tipo B e igual a 1.6 para o terreno tipo C, existindo, portanto, um factor de 1.185 entre estes dois tipos de terrenos de fundação. Os resultados das simulações realizadas para os dois locais de Portimão, assim como os valores dos registos obtidos nesses locais para o sismo de 2009/12/17, indiciam uma maior amplificação, como pode ser observada a partir do gráfico da Figura 7.

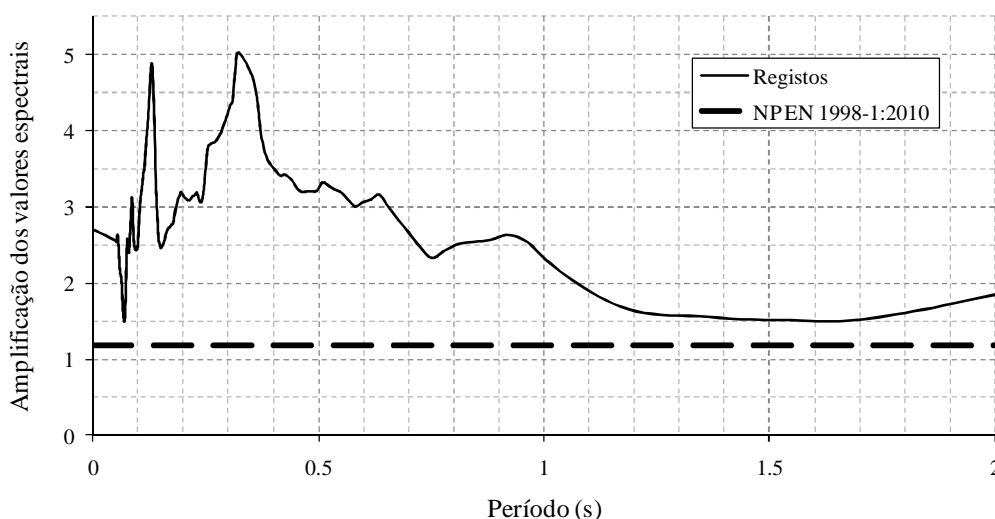


Figura 7: Quociente entre o máximo valor espectral obtido no local 1 (provável terreno tipo C) e o máximo valor espectral obtido no local 2 (provável terreno tipo B).

#### 4. SIMULAÇÃO DE SISMOS AJUSTADOS À NP EN 1998-1:2010

O EC8 permite a utilização de acelerogramas simulados nas análises sísmicas de estruturas desde que se cumpram os seguintes requisitos:

- deverão ser utilizados, no mínimo, 3 acelerogramas;
- a média dos valores da resposta espectral de aceleração com período nulo (calculada a partir dos registos no tempo) não deverá ser inferior ao valor de  $a_g S$  para o local em questão;
- no domínio dos períodos compreendidos entre  $0,2T_1$  e  $2T_1$ , sendo  $T_1$  o período fundamental da estrutura na direcção segundo a qual será aplicado o acelerograma, nenhum valor do espectro de resposta elástica médio com 5 % de amortecimento, calculado a partir de todos os registos no tempo, poderá ser inferior a 90 % do valor correspondente do espectro de resposta elástica com 5 % de amortecimento.

Para ser possível a utilização da resposta média obtida de todas as análises sísmicas realizadas, será necessário a utilização de um mínimo de sete acelerogramas simulados, caso contrário terão que ser considerados os resultados mais desfavoráveis dessas análises sísmicas.

Para Portugal Continental será necessário gerar acelerogramas para dois cenários: os sismos tipo 1 (epicentro afastado do local em estudo, referente, em geral, aos sismos com epicentro na região Atlântica) e tipo 2 (epicentro próximo do local em estudo, referente, em geral, aos sismos com epicentro no território Nacional) da NP EN 1998-1:2010. Além disso, será necessário cumprir as regras estipuladas no EC8 (anteriormente referidas), o que não é uma tarefa fácil, dado que os espectros de resposta elástica dos códigos sísmicos não representam, em princípio, um único evento sísmico.

Para a verificação da possibilidade de se recorrer a métodos estocásticos de geração de movimentos sísmicos simulados para a análise sísmica de estruturas, foram gerados acelerogramas simulados para terrenos tipo B e C localizados em Portimão (posicionados tal como é indicado na Figura 3), de modo a respeitarem os requisitos da

NP EN 1998-1:2010 para um edifício com período fundamental correspondente a  $T_1 = 0.5$  s (ou seja, será necessário verificar os requisitos do EC8 entre 0.1 s e 1 s). Para tal, para cada tipo de terreno e simulação, as espessuras e características das diversas camadas do perfil estratigráfico foram alteradas, assim como as velocidades das ondas S, ainda que dentro dos limites estipulados no EC8 ( $V_{S,30}$  entre 360 e 800 m/s para os terrenos tipo B e entre 180 e 360 m/s para os terrenos tipo C), tendo sido ajustada a velocidade das ondas S no substrato rochoso de modo a garantir um contraste de impedância que origine a amplificação das vibrações desejada.

O programa SIMULSIS permite que o utilizador seleccione um número de simulações a realizar e os períodos limite onde é feita a comparação entre as simulações e os espectros da NP EN 1998-1:2010, seleccionando os resultados que apresentem o menor desvio médio ( $\sigma$ ), tal como é proposto por alguns autores [2], a partir da seguinte expressão:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} \left( \frac{Se_{sim}(T_i) - Se_{EC8}(T_i)}{Se_{EC8}(T_i)} \right)^2} \quad (5)$$

Em função do espectro de resposta médio das simulações poderá ser necessário aumentar os valores espectrais num determinado intervalo de períodos, de modo a responder às exigências do EC8. Para tal, é possível aumentar a amplificação resultante das camadas de solo superficial nessa gama de períodos. A ordem de grandeza do valor da espessura total das camadas até ao substrato rochoso pode ser determinada a partir da Eq. (6), que é exacta para resposta linear de uma camada de solo homogéneo assente sobre substrato rígido [18], em que  $T_s$  é o período fundamental da coluna de solo e  $h$  é a espessura até ao substrato rochoso.

$$T_s = \frac{4 \cdot h}{V_{S,30}} \quad (6)$$

#### 4.1. Cenário com sismos afastados (acção sísmica tipo 1)

Para o cenário de sismo afastado foi adoptado um sismo com uma magnitude de 8.5, correspondente a uma falha inversa, cuja projecção à superfície do respectivo plano de falha foi localizada tal como é ilustrado na Figura 8. A actividade sísmica nesta zona tem sido constante nas últimas décadas, ainda que os eventos apresentem fracas magnitudes, sendo que o sismo de 2009/12/17 foi o maior evento sísmico ocorrido nesse intervalo de tempo. As simulações foram realizadas com o padrão de radiação variável calculado para os raios sísmicos directo e indirecto, tangente à vertical no local de estudo [11].

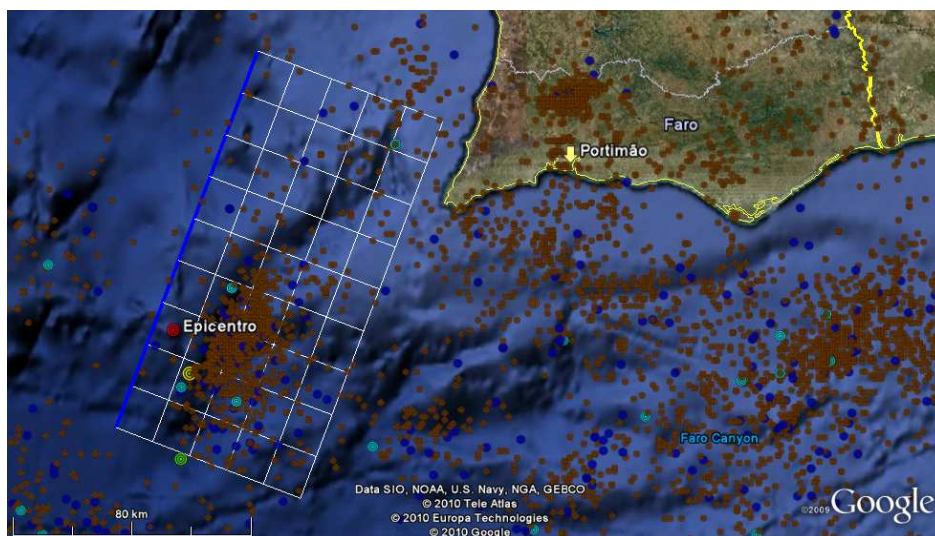


Figura 8: Localização da falha adoptada para o cenário do sismo distante.

As simulações para o local 1 (terreno tipo C) foram realizadas considerando uma queda de tensão média de 110 bar (valor adoptado para a simulação do sismo de 2009/12/17). Para o local 2 (terreno tipo B), foi necessário aumentar o valor da queda de tensão média para 160 bar. Foram seleccionadas simulações de modo a serem cumpridos os requisitos impostos no EC8 para um período fundamental de uma estrutura igual a  $T_1 = 0.5$  segundos. Os resultados estão apresentados nas Figuras 9 e 10.

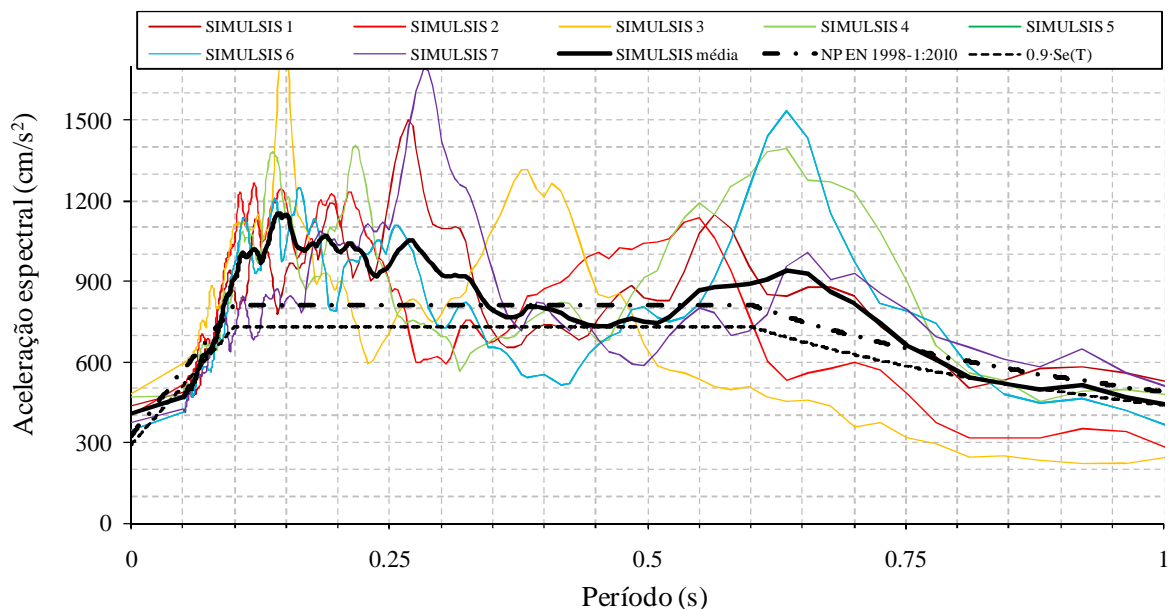


Figura 9: Simulações realizadas para o cenário de sismo afastado (acção tipo 1), admitindo uma queda de tensão média de 110 bar, para o local 1 (para diversos terrenos tipo C) situado em Portimão.

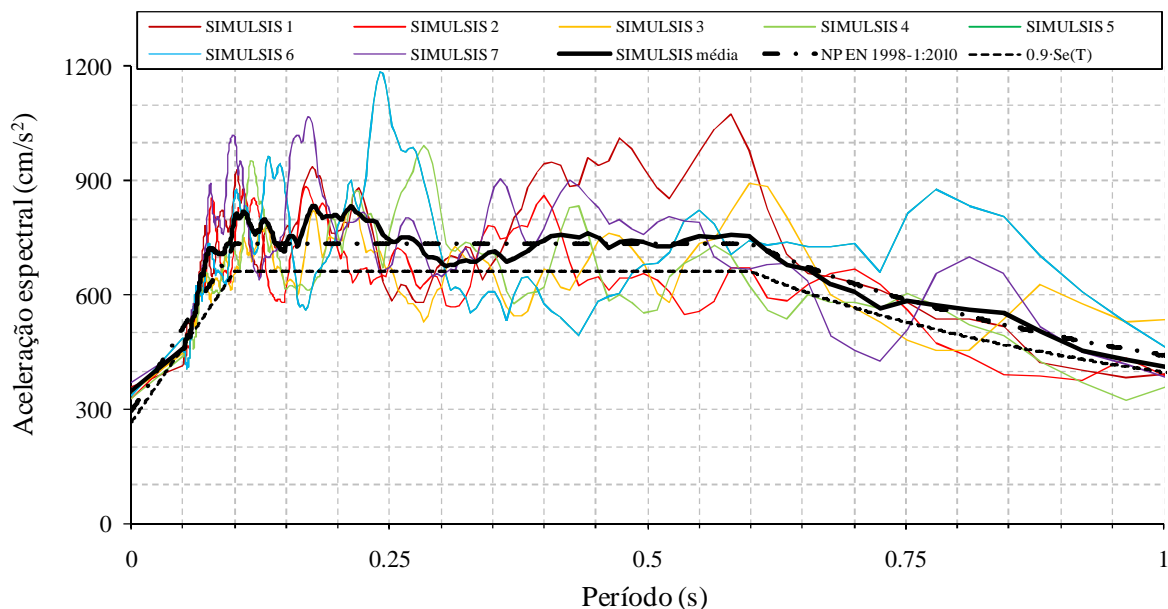


Figura 10: Simulações realizadas para o cenário de sismo afastado (acção tipo 1), admitindo uma queda de tensão média de 160 bar, para o local 2 (para diversos terrenos tipo B) situado em Portimão.

#### 4.2. Cenário com sismos próximos (acção sísmica tipo 2)

Para o cenário de sismo próximo foi adoptado um sismo com uma magnitude de 5.7, na falha de Portimão (falha de desligamento), tal como é ilustrado na Figura 11. Foi considerado um padrão de radiação variável e uma queda de tensão média variável entre 45 e 55 bar. Os resultados estão apresentados nas Figuras 12 e 13.

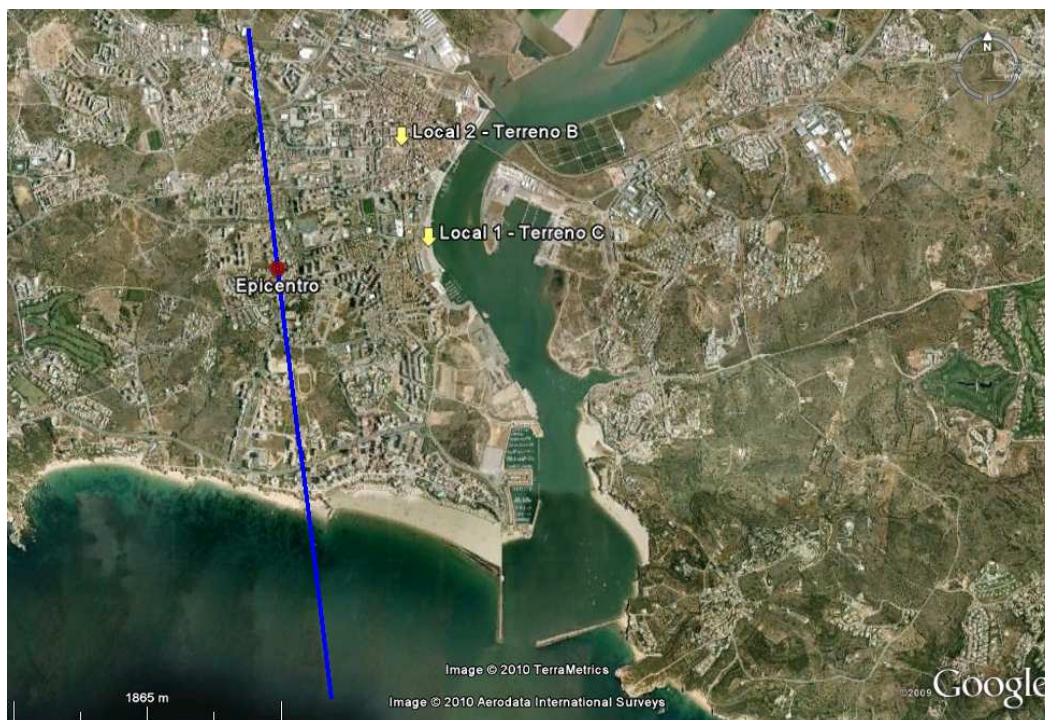


Figura 11: Localização da falha adoptada para o cenário do sismo próximo.

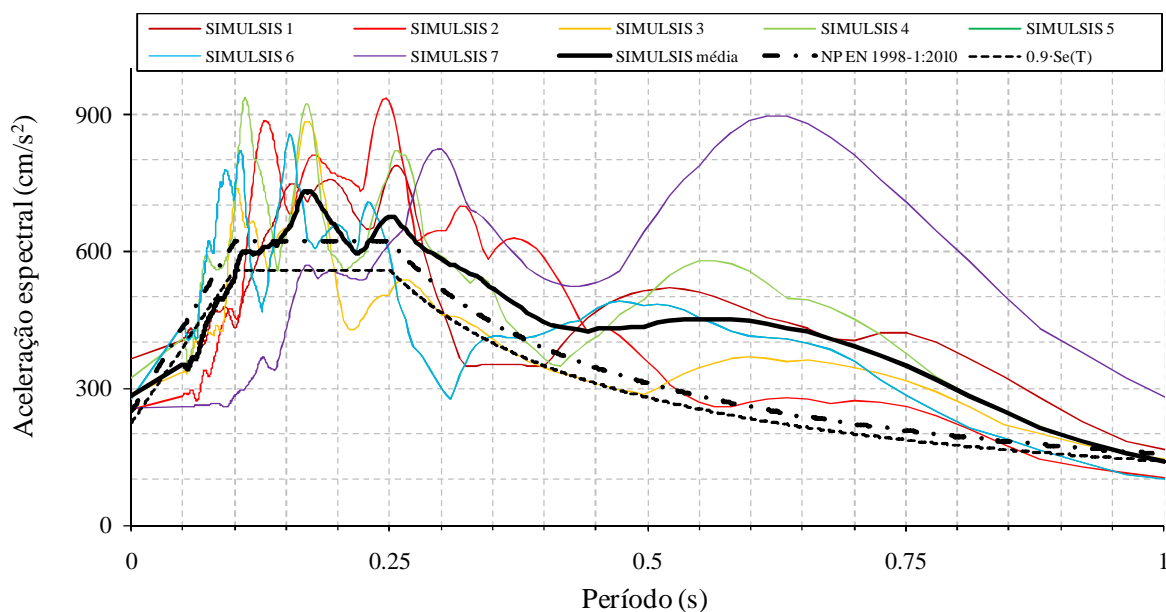


Figura 12: Simulações realizadas para o cenário de sismo próximo (acção tipo 2), admitindo uma queda de tensão média variável entre 45 e 55 bar, para o local 1 (para diversos terrenos tipo C) situado em Portimão.

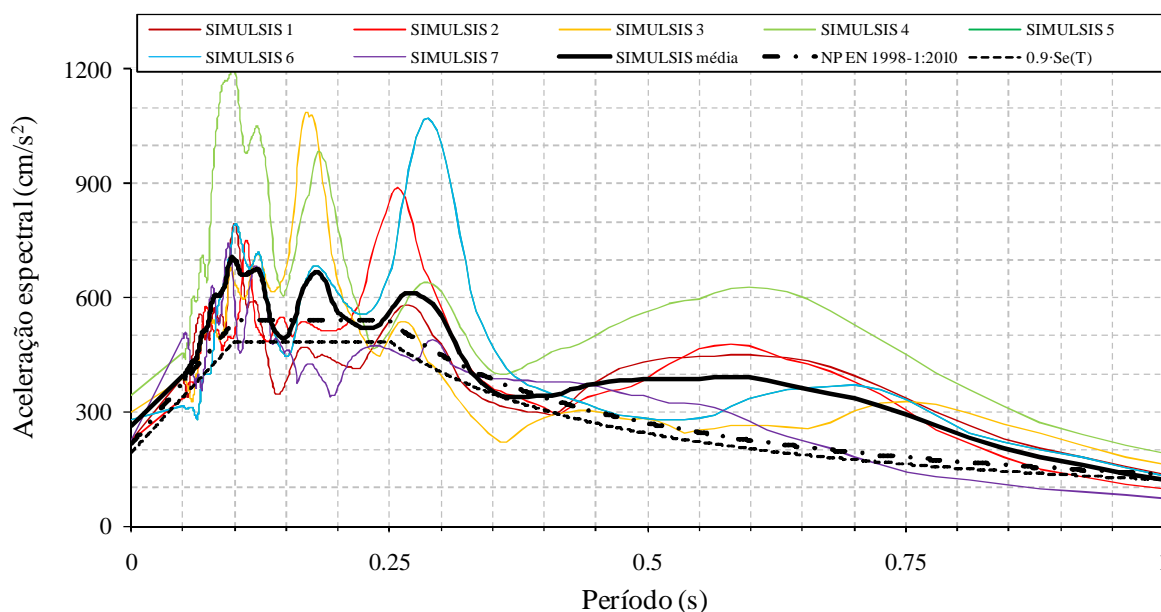


Figura 13: Simulações realizadas para o cenário de sismo próximo (acção tipo 2), admitindo uma queda de tensão média variável entre 45 e 55 bar, para o local 2 (para diversos terrenos tipo B) situado em Portimão.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados das simulações realizadas para o sismo de 2009/12/17 parecem demonstrar que o programa SIMULSIS tem uma razoável capacidade em reproduzir os efeitos do sismo.

Em relação à utilização do SIMULSIS para a geração de acelerogramas destinados à análise sísmica de estruturas, no domínio do tempo, e no contexto dos requisitos estipulados na NP EN 1998-1:2010, é possível concluir que é viável a sua utilização, tal como é ilustrado nos exemplos constantes nos gráficos das Figuras 9,10,12 e 13. Contudo, se pretendermos minimizar os desvios, poderá ser um processo moroso e que requer algum conhecimento prévio sobre a forma como as diferentes características dos perfis estratigráficos dos terrenos de fundação poderão influenciar os valores dos espectros de resposta das simulações.

A partir das diversas simulações realizadas, foi possível observar que, para o cenário do sismo mais próximo (sismo tipo 2), é difícil atingir os valores dos espectros de resposta constantes na NP EN 1998-1:2010 para os períodos próximos de um segundo, sendo necessária a consideração de perfis estratigráficos que são totalmente irrealistas no contexto do Algarve, de forma a garantir uma maior amplificação para esses períodos. Quando se comparam os resultados das simulações realizadas para o sismo de 2009/12/17 e os valores dos registos, é possível observar (Figuras 5 e 6) que, nessa gama de períodos, os espectros obtidos com o SIMULSIS apresentam valores superiores, contrariando o que foi observado em relação à NP EN 1998-1:2010.

Os resultados médios das simulações para o cenário de sismo distante, e para o terreno tipo B, apresentaram a melhor concordância com os espectros da NP EN 1998-1:2010. No entanto, tal exigiu a consideração de uma grande magnitude ( $M=8.5$ ) e de uma elevada queda de tensão média (160 bar).

Quando considerados os efeitos dos solos de fundação, verificou-se que os valores obtidos para os espectros de resposta das simulações ultrapassaram, facilmente, os valores constantes na NP EN 1998-1:2010, pelo que será importante a realização de mais estudos tendo em conta os possíveis perfis estratigráficos existentes nas diferentes regiões, designadamente em relação ao Algarve, e que se pretende realizar no futuro. Esses estudos deverão contemplar as incertezas nas espessuras e características das diferentes camadas de solo, e respectivos contrastes de impedância, para cada Município, que, como foi evidente nas simulações realizadas, muito afectam a aparência do espectro de resposta (o que significa que têm uma grande influencia nos valores de  $T_B$ ,  $T_C$  e  $T_D$ ).

assim como no nível de amplificação observada. A necessidade desses estudos é confirmada, não somente pelas simulações realizadas, mas pelos valores obtidos dos registos do sismo de 2009/12/17, que, claramente, evidenciaram uma amplificação máxima superior à estipulada na NP EN 1998-1:2010.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] IPQ (2010) *NP EN 1998-1. Eurocódigo 8: Projecto de estruturas para resistência aos sismos. Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*. Instituto Português da Qualidade, Caparica, Portugal, 230 p.
- [2] Katsanos, E. I.; Sextos, A. G. and Manolis, G. D. (2010) Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* **30** (4), 157–169.
- [3] Bommer, J. J. and Acevedo, A. B. (2004) The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis. *Journal of Earthquake Engineering* **8** (Special Issue 1), 43-92.
- [4] Iervolino, I. and Cornell, C. A. (2005) Record selection for nonlinear seismic analysis of structures. *Earthquake Spectra* **21** (3), 685–713.
- [5] Erdik, M. and Durukal, E. (2006) Strong ground motions. In: Ansal, A., editors. *Recent advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation*, 67-100. Springer, Dordrecht, Netherlands.
- [6] Boore, D. M. (2005) SMSIM — Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: Version 2.3 - A Revision of OFR 96–80–A. Report Open-File Report of 00-509, U.S. Geological Survey, Menlo Park.
- [7] Boore, D. M. (1983) Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra. *Bulletin of the Seismological Society of America* **73** (6), 1865-1894.
- [8] Boore, D. M. (2003) Simulation of Ground Motion Using the Stochastic Method. *Pure and Applied Geophysics* **160**, 635-676.
- [9] CodeGear (2007) Delphi 2007 for Win32, Professional Edition. Borland.
- [10] Motazedian, D. and Atkinson, G. M. (2005) Stochastic finite-fault modeling based on a dynamic corner frequency. *Bulletin of the Seismological Society of America* **95** (3), 995-1010.
- [11] Estêvão, J. M. C. and Oliveira, C. S. (2008) Stochastic ground motion simulation with geological site effects in damage assessment In: Proceedings of the International Seminar on Seismic Risk and Rehabilitation of Stone Masonry Housing. Horta, Faial, 61-64, CD015, 14 pag.
- [12] Boore, D. M. and Boatwright, J. (1984) Average body-wave radiation coefficients. *Bulletin of the Seismological Society of America* **74** (5), 1615-1621.
- [13] Aki, K. and Richards, P. G. (2002) *Quantitative seismology*, 2nd ed. University Science Books, Sausalito, California, 700 p.
- [14] Carvalho, A.; Costa, A. C. and Oliveira, C. S. (2009) A finite-fault modeling of the 1755 Lisbon earthquake sources. In: Mendes-Victor, L.A.; Oliveira, C.S.; Azevedo, J. and Ribeiro, A., editors. *The 1755 Lisbon earthquake: revisited*, 433-454. Springer.
- [15] Wells, D. L. and Coppersmith, K. J. (1994) New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America* **84** (4), 974-1002.
- [16] Hanks, T. C. and Kanamori, H. (1979) A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research* **84** (B5), 2348-2350.
- [17] Reinoso, E. and Ordaz, M. (2001) Duration of strong ground motion during Mexican earthquakes in terms of magnitude, distance to the rupture area and dominant site period. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **30** (5), 653-673.
- [18] Kramer, S. L. (1996) *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall, Inc, New Jersey, 653 p.